Journal of Agricultural Machinery
Vol. 8, No. 2, Fall - Winter 2018, p. 333-345

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۸، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۷، ص ۳۴۵-۳۳۳

پیش‌بینی توزیع دما در قطعه چوبی تنه درخت خرما تحت گرمایش مایکروویو جهت مبارزه با آفت سرخرطومی خرما

سعید ملازهی[۱]- حسن صدرنیا[۲*]- محمدرضا بیاتی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۴/۱۱

چکیده

امواج مایکرو با برخورد به مولکول‌های آب، ایجاد گرما در جسم می‌نمایند. بـه کمـک نـرم‌افـزار کامسـول و تعیـین برخـی پارامترهـای فیزیکـی و مغناطیسی چوب تنه درخت خرما، در آزمایشگاه مواد، دما در نقاط مختلف چوب تنه به‌دست آمد. در این تحقیق، سه نقطـه در مسـیر یکـی از قطرهـای مکعب چوبی در نظر گرفته شد و نمودار درجه حرارت- زمان شبیه‌سازی گردید. سپس یک نمونـه از قطعـه چـوبی بـا همـان ابعـاد، در داخـل محفظـه مایکروویو با فرکانس ۲/۴۵ GHz تحت امواج مایکرو قرار گرفت و به کمک یک ترمومتر دیجیتالی، دما در نقاط و زمان‌های مشابه ثبت شد. داده‌هـای تجربی و شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار SPSS مقایسه شدند. نتایج تحلیل آماری نشان داد که در نقطـه ۱ (مرکـز مکعـب)، تفـاوت در سـطح ۵ درصـد معنی‌دار بوده ولی در نقاط ۲ (بالا سمت راست مکعب) و ۳ (پایین سمت چپ مکعب)، تفاوت معنی‌داری در سـطح ۵ درصـد وجـود نـدارد. همچنـین بـا مقایسه میانگین‌ها و تحلیل واریانس مشخص شد که اختلاف دما بین نقطه ۲ با نقاط ۱ و۳ در شبیه‌سازی و نتایج تجربی وجود دارد. ایـن نتیجـه نشـان می‌دهد مدل شبیه‌سازی به خوبی دما را در نقاط مختلف قطعه چوبی پیش‌بینی می‌کند. این تحقیق با هدف مبارزه با آفت سوسک سرخرطومی خرما بـه کمک مایکروویو و حذف سموم کشاورزی انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: امواج مایکرو، پیش‌بینی درجه‌حرارت، شبیه‌سازی، نرم‌افزار کامسول

مقدمه

امواج الکترومغناطیس شامل میدان‌هـای الکتریکـی و مغناطیسـی عمود بر همدیگر است. مکانیسم حاکم بر مایکروویوها شامل تحریک مولکول‌های دوقطبی ناشی از نوسـان میـدان الکتریکـی بـرای مـواد غیرمغناطیسی است. این تحریک منجر به افـزایش انـرژی جنبشـی و افزایش درجه حرارت در مدت زمان کوتاه می‌گردد، این زمان بسـتگی به خصوصیات الکتریکی و فیزیکی مواد گرم شده دارد. در پاسخ مـواد به امواج مایکرو، مواد به سه دسته تقسیم مـی‌شـوند: ۱) مـوادی کـه امواج را منعکس می‌کنند (مواد با هدایت بالا) مثل فلـزات، ۲) مـوادی که امواج از میان آنها عبور می‌کنند مثل سرامیک، کوارتز و شیشه، ۳) مـوادی کـه امـواج را جـذب مـی‌کننـد مثـل کـربن، آب و متـانول. فرکانس‌های اختصاص‌یافته برای کاربردهـای تجـاری ۰/۹۱۵، ۲/۴۵، ۵/۲۸ و ۲۲GHz است. پایه و اساس مطالعات، آگـاهی از پارامترهـای خواص الکترومغناطیسی مواد، است و این خصوصـیات بـه فرکـانس، درجه‌حرارت و رطوبت مواد بستگی دارد (Nelson, 1996).

اندازه‌گیری درجه حرارت با ترمومتر در نقـاط مختلـف از اجسـام، گاهی سخت و غیرممکن می‌باشد، لذا برای حل این مشکل نرم‌افـزار ComsolMultiphysics به‌راحتی می‌تواند پیش‌بینی درجه‌حـرارت را در نقاط مدنظر انجام دهد.

پیش‌بینی رفتـار حرارتـی در تـوده میـوه بـا اسـتفاده از نـرم‌افـزار ComsolMultiphysics انجام شد که موقعیت نقطـه‌هـای گرمـا در طول گرمادهی با مایکروویو در دو حالت شبیه‌سازی و آزمایش تجربی برای دو تیمار تـوده یکنواخـت اسـتوانه‌ای و تـوده مجـزا بـه‌صـورت گلوله‌ای شکل، نزدیک به هم بودند. ماکزیمم اخـتلاف درجـه‌حـرارت بین نمونه آزمایش و شبیه‌سازی برای توده بستر 33^oC (با ۱۸٪ خطا) و برای توده گلوله‌ای 30^oC (با ۱۷٪ خطـا) بـه‌دسـت آمـد (Salema and Afzal, 2015). پرتودهی به کمـک مـایکروویو و ازن‌دهـی بـر روی باگاس نیشکر اعمال شد. بعد از هیدرولیز، توانایی استحصال قند با توجه به دو فاکتور توان پرتـودهی مـایکروویو در سـه سـطح ۱۷۰، ۴۵۰ و ۸۵۰ وات و زمان ماند در سـه سـطح ۲، ۶ و ۱۰ دقیقـه مـورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود کـه در تیمـار میکروویـو در

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استادیار، گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*- نویسنده مسئول: Email: Hassan.Sadrnia@ferdowsi.um.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v8i2.62524

سطح اطمینان ۹۹٪ اثر توان مایکروویو همچنین زمان مانند دارای اختلاف معنی‌دار است (Eqra *et al.*, 2015).

گرمادهی محصول پسته با امواج مایکرو نشان داد که گرمادهی به مدت ۵۰ ثانیه باعث مرگ و میر ۱۰۰ درصدی لاروهای سنین سوم تا چهارم و سن پنجم آفت شب‌پره هندی[1] می‌شود (Hajmohammadi *et al.*, 2013). اثر امواج مایکرو در مرگ و میر و مدل مرگ و میر برای آفت برنج[2] بر اساس درجه‌حرارت برنج با استفاده از اجاق مایکروویو متناوب در آزمایشگاه محرز شد (Zhao *et al.*, 2007). آفت سوسک سرخرطومی حنایی خرما[3] در مراحل رشدی مختلف شامل (تخم، لارو، شفیره و حشره بالغ) در زمان‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ ثانیه در معرض گرمایش مایکروویو قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین تلفات به‌ترتیب مربوط به مرحله لاروی و حشره بالغ است (Mollazehi and Sadrnia, 2016).

اندازه نمونه نقش مهمی در گرمای مایکروویو از جمله سرعت انتقال گرما در نمونه دارد، اندازه نمونه می‌تواند توزیع توان در محفظه و در نتیجه الگوی درجه‌حرارت را تغییر دهد (Curet *et al.*, 2009). شیب درجه‌حرارت در نتایج شبیه‌سازی و آزمایش برای معنی‌داری درجه‌حرارت مقایسه گردید و نتایج غیر مشابه بستگی به روش‌های مورد استفاده در اندازه‌گیری درجه‌حرارت داشت (Robinson *et al.*, 2008). دلیل شیب زیاد درجه‌حرارت‌ها می‌تواند غیر یکنواختی توزیع میدان الکتریکی، چگالی توان در محفظه‌ی مایکروویو، تغییر در دی‌الکتریک، خواص گرمایی مواد توده‌ای شکل و اندازه‌ی محفظه، موقعیت نمونه در محفظه باشد (Yakovlev, 2006). شبیه‌سازی عددی گرمای مایکروویو به کمک نرم‌افزار Comsol Multiphysics و مقایسه‌ی آن با اندازه‌گیری‌های تجربی به‌طور موفقیت‌آمیزی برای میوه در دو حالت توده یکنواخت استوانه‌ای و توده‌ی مجزا به‌صورت گلوله‌ای شکل اجرا شد (Zhao *et al.*, 2011). پیش‌بینی درجه‌حرارت برای قطعه‌ی چوبی تحت گرمایش مایکروویو با داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده به‌وسیله دوربین مادون قرمز مطابقت داشت (Rattanadecho, 2006). از نرم‌افزار ComsolMultiphysics برای شبیه‌سازی نمودارهای درجه‌حرارت در میله‌های چوبی، کربن، پیرکس و درصد ترکیبات متفاوت‌شان در بازه زمانی ۰ تا ۳۰۰ ثانیه، تحت شرایط متفاوت، استفاده گردید. نتایج نشان داد که میانگین درصد خطای نسبی بین درجه حرارت اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده برای دو حالت همرفت آزاد[4] و عایق کامل[5] به‌ترتیب ±۴٪ و ±۱۵٪ بود (Farag *et al.*, 2012). پیش‌بینی درجه‌حرارت در چوب درخت خرما به کمک نرم‌افزار HFSS[6] انجام گردید که استفاده از ۸ عدد آنتن شیپوری تابشی با تعیین مناسب‌ترین فرکانس ۲/۴۵ GHz، توان ۱۰۰W، درجه‌حرارت در فواصل ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ سانتی‌متر تعیین گردید (Al Shwear and Remili, 2016). در بحث گرمای القایی با تیمار مایکروویو به‌طور مستقیم فقط به قسمت خارجی درخت اثر خواهد داشت و قسمت‌های داخلی با استفاده از انتقال حرارت مورد هدف قرار خواهند گرفت (Massa *et al.*, 2011). تعدادی نخل زینتی برای تأثیر تیمار حرارتی مایکروویو مورد ارزیابی قرار گرفتند، در پایان، انتهای درختان برش داده شده و بلافاصله بعد از قرار گرفتن در معرض مایکروویو، نمودار درجه‌حرارت و میزان رطوبت با کمک دوربین‌گرمایی FLIR E060IR و رطوبت‌سنج به‌دست آمد. نتایج تست‌های مزرعه‌ای با داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی داشت و افزایش درجه‌حرارت مطابق با نواحی خارجی تنه درخت بود (Massa *et al.*, 2015).

علاوه بر مایکروویو، از امواج فراصوتی نیز برای تأثیر بر برخی خواص مکانیکی محصولات کشاورزی استفاده می‌گردد. تأثیر فرکانس (بدون موج، ۲۵ و ۴۵ کیلوهرتز)، دما (۲۵، ۵۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد) و زمان موجدهی (۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه) بر روی نمونه‌های چغندرقند مطالعه گردید، نتایج نشان داد که فاکتورهای فرکانس، دما و زمان تأثیر معنی‌داری بر افزایش استخراج قند از چغندرقند داشتند (Hedayati *et al.*, 2013).

یافته‌های محققین در خصوص شبیه‌سازی و اندازه‌گیری تجربی دما، نشان از پیش‌بینی نزدیک نرم‌افزارهای شبیه‌ساز دما روی محصولات و درختان حکایت دارد. با توجه به اینکه شبیه‌سازی گام نخست در طراحی می‌باشد، به کمک نرم‌افزار شبیه‌ساز کامسول می‌توان قبل از طراحی و ساخت دستگاه، شرایط پیش‌رو را پیش‌بینی نمود و پس از اطمینان از حصول نتیجه مطلوب، اقدام به ساخت دستگاه نمود، لذا این تحقیق می‌تواند گام اول در بحث ساخت دستگاهی باشد که قادر به مبارزه با آفت سرخرطومی درخت خرما به کمک امواج مایکرو باشد. با توجه به اینکه امروزه برای مبارزه با آفت مذکور از انواع سموم شیمیایی استفاده می‌گردد، هدف از طراحی این دستگاه مبارزه با آفات به کمک امواج مایکرو، حذف سم از چرخه تولید محصولات کشاورزی و تولید محصولات ارگانیک می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایشات تجربی

قطعه چوبی

از یک قطعه مکعبی چوبی درخت خرما رقم مضافتی با ابعاد

1- Plodia interpunctella
2- Sitophilus oryzae
3- Rhynchophorus ferrugineus
4- Free convection
5- Perfect insulator
6- High Frequency Structure Simulator

۷۸× ۸۶× ۱۰۳ میلی‌متر که از قسمت داخلی تنه درخت تهیه شده بود، استفاده گردید (شکل ۱).



شکل ۱- نمونه چوبی تنه درخت خرما برای انجام تیمار حرارتی مایکروویو

Fig.1. A piece of date palm trunk for microwave thermal treatment

ترمومتر دیجیتالی

جهت اندازه‌گیری دما در داخل قطعه چوبی تحت گرمایش مایکروویو از ترمومتر دیجیتالی-914C/F LUTRONTM با دقت $\pm 1^{C^\circ}$ و سیم پروب مدل TP- 02 با محدوده دمایی اندازه‌گیری بین ۵۰- تا۹۰۰ درجه‌سانتی‌گراد استفاده گردید (شکل ۲) که سنسور ترمومتر در محل‌های مشخص قطعه چوبی و نمایشگر ترمومتر در بیرون محفظه مایکروویو مستقر گردید. اندازه‌گیری‌ها در آزمایشگاه هنرستان کشاورزی شهید رجایی خاش انجام شد.



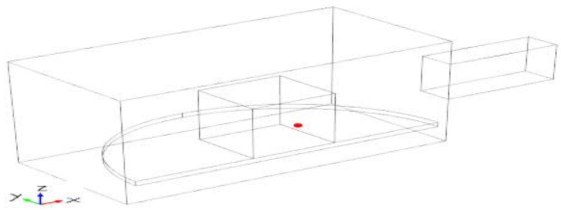
شکل ۲- ترمومتر دیجیتالی جهت اندازه‌گیری دمای نمونه چوبی

Fig.2. A digital thermometer to measurement the temperature of wooden sample

اندازه‌گیری دما در نقطه ۱

قطعه چوبی به دو قسمت مساوی تقسیم شده و سنسور دماسنج در وسط آن قرار گرفت و مجدداً دو قطعه نیم شده را به‌وسیله نخ به هم محکم نموده و در داخل محفظه مایکروویو قرار می‌دهیم، دمای اولیه نمونه و محفظه ۲۷ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد سپس مایکروویو را روشن نموده و در فواصل زمانی ۲۰ ثانیه به مدت ۱۰ دقیقه دمای قطعه چوبی را از ترمومتر دیجیتالی یادداشت می‌کنیم.

مختصات نقطه ۱ که مرکز مکعب در نظر گرفته شده x=۰/۱۷ m، y=۰ و z=۰/۰۶۹۵ m انتخاب شدند (شکل ۳). همچنین این ابعاد برای مکعب چوبی شبیه‌سازی شده منظور شدند که دمای شبیه‌سازی شده در نقطه مذکور از نتایج خروجی شبیه‌سازی است.

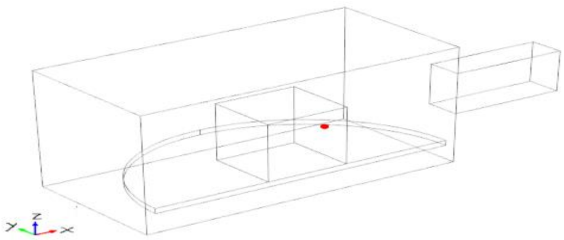


شکل ۳- موقعیت هندسی نقطه ۱ شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار کامسول

Fig.3. The geometry position of point (1) was simulated by Comsol software

اندازه‌گیری دما در نقطه ۲

مختصات نقطه ۲ که نقطه روی قطر مکعب قسمت بالا سمت راست در نظر گرفته شده x=۰/۱۹۱۵ m، y= ۰ و z=۰/۱۲۱۲۵ m انتخاب شدند (شکل ۴).

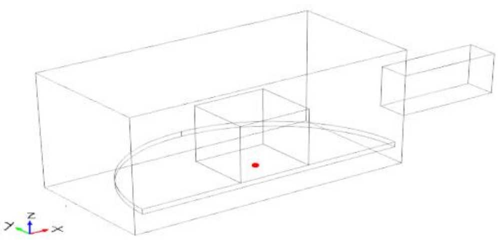


شکل ٤- موقعیت هندسی نقطه‌ی ۲ شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار کامسول

Fig.4. The geometry position of point (2) was simulated by Comsol software

اندازه‌گیری دما در نقطه ۳

مختصات نقطه ۳ که نقطه، روی قطر مکعب قسمت پایین سمت چپ در نظر گرفته شد x=۰/۱۴۸۵ m، y= ۰ و z =۰/۰۶۹۵ m انتخاب شدند (شکل ۵).



شکل ۵- موقعیت هندسی نقطه ۳ شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار کامسول

Fig.5 . The geometry position of point (3) was simulated by Comsol software

مدل شبیه‌سازی عددی

مدل‌سازی در نرم‌افزار کامسول انجام شد. این نرم‌افزار یک مجموعه شبیه‌سازی است که می‌تواند معادلات دیفرانسیل سیستم‌های غیرخطی را توسط مشتق‌های جزئی روش اِلمان محدود در فضاهای یک، دو و سه بعدی حل نماید. این نرم‌افزار می‌تواند در حضور چالش‌هایی نظیر میدان‌های الکترومغناطیسی، کشش، دینامیک سیالات و دینامیک گاز به‌خوبی برای کاربران مؤثر باشد. از قابلیت‌های این نرم‌افزار امکان شبیه‌سازی محفظه مایکروویو و تعریف مشخصات فیزیکی مورد نیاز مواد است که قادر به نمایش توزیع درجه حرارت می‌باشد که می‌توان نمودار درجه حرارت- زمان را نیز به‌دست آورد.

معادلات الکترومغناطیس

پدیده الکترومغناطیس در گرمای مایکروویو به‌وسیله معادلات ماکسول برای حل در شرایط مرزی است. انرژی الکترومغناطیس به گرما تبدیل می‌شود وقتی با مواد دی‌الکتریک فعل و انفعال داشته باشد. این تبدیل به‌وسیله توان جذب، در مواد از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$P_{ab}= (\omega\varepsilon_0 \varepsilon''\, E^2)/2$ (۱)

ثابت دی‌الکتریک مواد به فرم مختلط است که ε' ثابت دی‌الکتریک واقعی و ε'' قسمت موهومی، ضریب اتلاف است.

$\varepsilon^*=\varepsilon' - j\varepsilon''$ (۲)

$\nabla\times H= - j\omega\, \varepsilon_0\varepsilon^*\, E$ (قانون ماکسول – آمپر) (۳)

$\nabla\times E= j\omega\mu H$ (قانون فارادی) (۴)

$\nabla. (\varepsilon E)=0$ (قانون الکتریکی گوس) (۵)

$\nabla\times H= 0$ (قانون مغناطیسی گوس) (۶)

E شدت میدان الکتریکی، H شدت میدان مغناطیسی، ω سرعت زاویه ای، ε_0 گذردهی در فضای آزاد و ε^* ثابت دی الکتریک مختلط است.

معادله حاکم بر میدان الکتریکی به‌صورت زیر است

$$\nabla\, \mu_r^{-1}(\nabla\times E) - K_0^2(\varepsilon_r - \frac{J\alpha}{\omega\varepsilon_0})E = 0 \quad (۷)$$

شماره موج K_0 از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$K_0= \frac{\omega}{c_0} \quad (۸)$$

گرمای الکترومغناطیس با انتقال حرارت از معادله انرژی فوریه، پیروی می‌کند:

$$\rho = C_P\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k\nabla T) + Q \quad (۹)$$

که ρ چگالی برحسب $(kg\ m^{-3})$، C_p ظرفیت گرمایی ویژه $(Jkg^{-1}K^{-1})$، K رسانایی $(Wm^{-2}\,k^{-1})$، T درجه حرارت (درجه کلوین) و Q منبع انرژی است که نماینده تلفات الکترومغناطیس (Q_L) ناشی از میدان الکتریکی و مغناطیسی است.

$Q_L= Q_{rh} + Q_{ml}$ (۱۰)

تلفات مقاومتی (Q_{rh}) به‌وسیله رابطه (۱۱) بیان می‌شود.

جدول ۱- خصوصیات الکترومغناطیسی و ترموفیزیکی نمونه چوبی درخت خرما (رقم مضافتی)

Table 1- Electromagnetic properties of wooden sample of date (Mozafati variety)

خصوصیات Properties	نماد Symbol	مقدار Value	واحد Unite
ثابت دی‌الکتریک Relative Permittivity	ε^*	30.3[x]	1
نفوذپذیری مغناطیسی Relative Permeability	μ	1[xx]	1
ضریب هدایت الکتریکی Electrical Conductivity	σ	1.17	$S.m^{-1}$
هدایت گرمایی Thermal Conductivity	k	0.68460	$W.m^{-1}. K^{-1}$
چگالی Density	ρ	1003	$kg.m^{-3}$
ظرفیت گرمایی Heat Capacity	c_p	1.92	$J.kg^{-1}K^{-1}$

[x] :(Al Shwear and Remili, 2016)

[xx] : (Clarke, 2012)

$$Q_{rh}=\frac{1}{2}R_e(j.\boldsymbol{E}^*) \quad (۱۱)$$

$$Q_{ml}=\frac{1}{2}R_e(i\omega B.H^*) \quad (۱۲)$$

شبیه‌سازی بر اساس فرضیات زیر کار می‌کند:
معادلات انتقال حرارت با دی‌الکتریک ثابت حل شدند، جذب امواج به‌وسیله هوا قابل چشم‌پوشی است، تمام مواد غیرمغناطیس هستند.

مشخصات فیزیکی مورد نیاز برای قطعه چوبی

برخی خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و مغناطیسی مورد نیاز شبیه‌ساز در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی و آزمایشگاه مواد و انرژی تهران تعیین گردیدند که نتایج در جدول ۱ آمده‌اند.

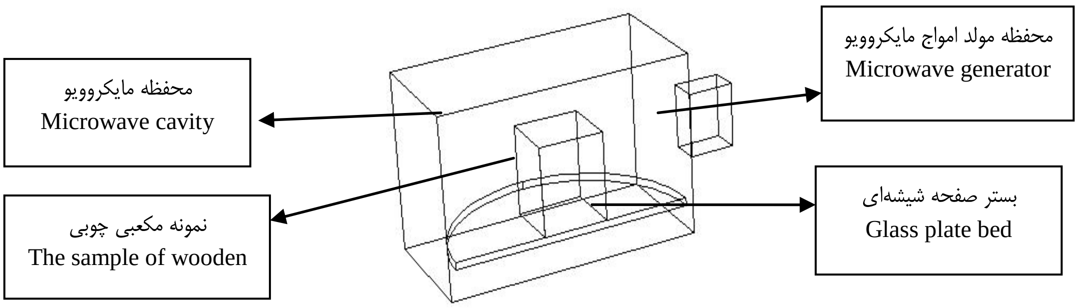
برای شبیه‌سازی تنظیمات زیر انجام شد:
الف) هندسه مدل: محفظه مایکروویو، محفظه مولد امواج، نمونه مکعبی چوبی، بستر استوانه‌ای شیشه‌ای همچنین مکان هندسی هر کدام از قسمت‌ها نسبت به مبدأ مختصات مطابق جدول ۲ طراحی شدند (شکل ۶).

به‌منظور گرمادهی تنه چوبی درخت خرما، از یک دستگاه مایکروویو (FUMA، ژاپن) با فرکانس ۲۴۵۰ مگاهرتز استفاده شد (شکل ۷).

جدول ۲– ابعاد محفظه دستگاه مایکروویو جهت ایجاد تیمار حرارتی

Table 2– The dimension of microwave set chest for thermal treatment

بعد **Size**	مقدار **Value (mm)**
عرض محفظه مایکروویو Oven width	340
عمق محفظه مایکروویو Oven depth	330
ارتفاع محفظه مایکروویو Oven height	210
شعاع صفحه شیشه‌ای Glass plate radius	160
ارتفاع صفحه شیشه‌ای Glass plate height	9
فاصله صفحه شیشه‌ای از کف Glass plate base	35
عرض محفظه مولد Generator width	120
عمق محفظه مولد Generator depth	76
ارتفاع محفظه مولد Generator height	73



شکل ٦– مدل شبیه‌سازی شده دستگاه مایکروویو در نرم‌افزار کامسول

Fig.6. The pattern of simulated microwave set in Comsol software



شکل ۷– دستگاه مایکروویو جهت ایجاد تیمار حرارتی روی نمونه چوبی

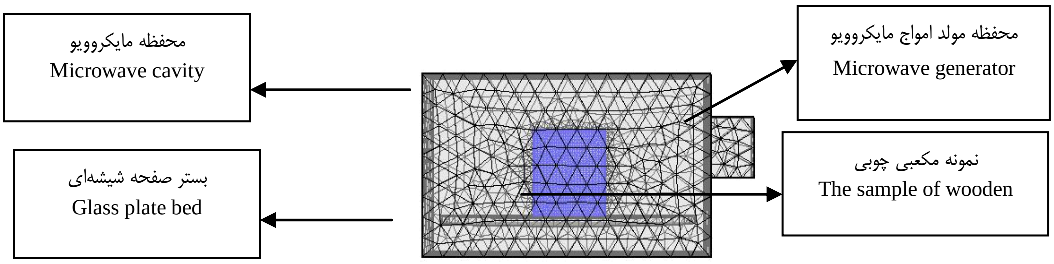
Fig.7 .The microwave set for thermal treatment on wooden sample

ب) در نرم‌افزار کامسول محیط‌های موجود در محفظه شبیه‌سازی شده شامل محدوده هوا، نمونه چوبی مورد نظر، محدوده انتقال یا عدم انتقال حرارت و محدوده مرزی تعیین گردیدند.

پ) تعیین جنس و خصوصیات مواد به‌کار رفته در شبیه‌سازی: محدوده هوا، محفظه و دیواره ایزوله از جنس مس و خصوصیات شیشه استوانه‌ای شامل ثابت دی‌الکتریک، نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب هدایت الکتریکی به‌کار رفته تعیین شدند.

ت) تعیین خصوصیات مربوط به نمونه چوبی: این مقادیر خصوصیات الکترومغناطیسی و فیزیکی مربوط به نمونه چوبی را ارائه می‌دهند که در جدول ۱ آمده‌اند.

ث) مش‌بندی: در این شبیه‌سازی از نمونه مش چهاروجهی، به‌ترتیب برای کل مجموعه و نمونه مکعبی تعداد ۱۶۰۹۷۷ و ۱۳۱۰۹۰ عدد مش استفاده گردید. همچنین با توجه به متقارن بودن مجموعه محفظه و نمونه و همچنین ساده‌سازی مدل، نصف شکل، مدل‌سازی و مش‌بندی شد (شکل ۸).



شکل ۸– مش‌بندی محفظه مایکروویو و نمونه چوبی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار کامسول

Fig.8. Meshing The microwave box and simulated wooden sample in Comsol software

ج) تعیین فرکانس و محدوده زمانی: با توجه به محدوده فرکانس اختصاص داده شده به فعالیت‌های علمی و تجاری، فرکانس GHz ۲/۴۵ و مدت زمان صفر تا ۶۰۰ ثانیه انتخاب شد.

چ) حل مساله: پس از اجرای مراحل فوق، شبیه‌ساز اقدام به محاسبه و آنالیز دما در تمام نقاط نمود.

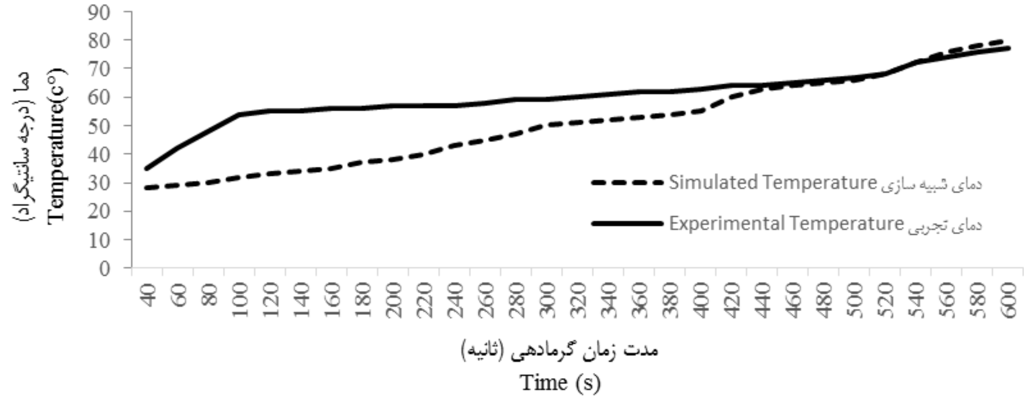
ح) نتایج شبیه‌سازی: نمودار درجه حرارت– زمان یکی از خروجی‌های این شبیه‌ساز است که در نقاط مورد نظر روی نمونه چوبی، استخراج شد.

نتایج و بحث

به‌منظور مقایسه آماری بین دمای حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی نقاط انتخاب شده روی قطر نمونه‌ی مکعبی چوبی از آزمون t استفاده شد. برای کاهش خطا در ثبت دماهای تجربی، از ۳ تکرار آزمایش اندازه‌گیری استفاده شد و میانگین آنها به‌عنوان دمای تیمار در زمان خاص انتخاب شد.

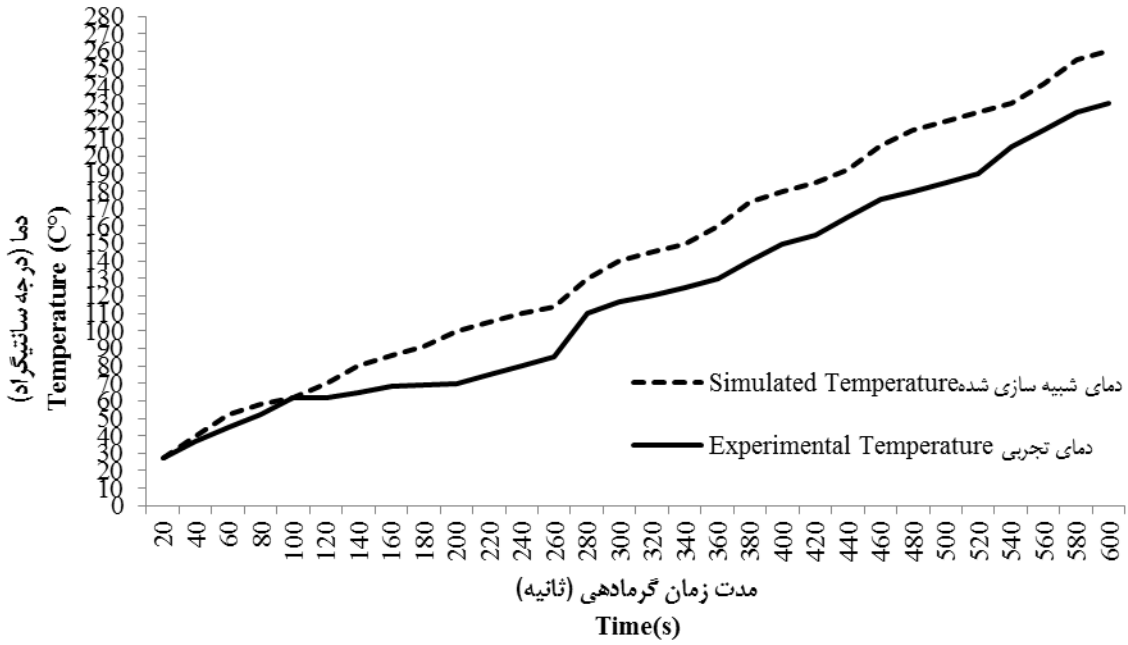
با توجه به اینکه دمای اولیه قطعه ۲۷ درجه سانتی‌گراد است دمای شبیه‌سازی با شیب نسبتاً یکنواختی نسبت به زمان افزایش می‌یابد ولی دمای تجربی در فاصله زمانی صفر تا ۱۰۰ ثانیه بیشترین روند افزایشی را دارد، اما دما بعد از ۱۰۰ ثانیه با شیب نسبتاً کمی افزایش می‌یابد. در فاصله زمانی ۴۴۰ تا ۵۶۰ ثانیه دمای شبیه‌سازی و تجربی تقریباً با هم برابر هستند، اما بعد از ۵۶۰ ثانیه دمای شبیه‌سازی نسبت به دمای تجربی افزایش جزئی را نشان می‌دهد، حداکثر دما پس از ۶۰۰ ثانیه به حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد (شکل ۹). میانگین دماهای تجربی و شبیه‌سازی شده در نقطه ۱ به‌ترتیب ۶۰/۳۱ و ۵۰ /۹۶ درجه سانتی‌گراد است.

نتایج آزمون t گروه‌های مستقل، نقاط ۱ و۲ و۳ را برحسب دمای شبیه‌سازی شده و تجربی نشان می‌دهد که در نقطه ۱ بین دمای شبیه‌سازی شده و تجربی با توجه به نمره t (۲/۵۳)، درجه آزادی (۵۸) و سطح معنی‌داری (۰/۰۱۴) در سطح ۵درصد تفاوت معنی دارد که این امر منطبق با یافته‌های Salema و Afzal (۲۰۱۵) نمی‌باشد.



شکل ۹- نمودار دمای شبیه‌سازی شده و دمای تجربی در نقطه ۱متناسب با مدت زمان گرمادهی

Fig. 9. The experimental and simulated temperature profile for the time heating in point1

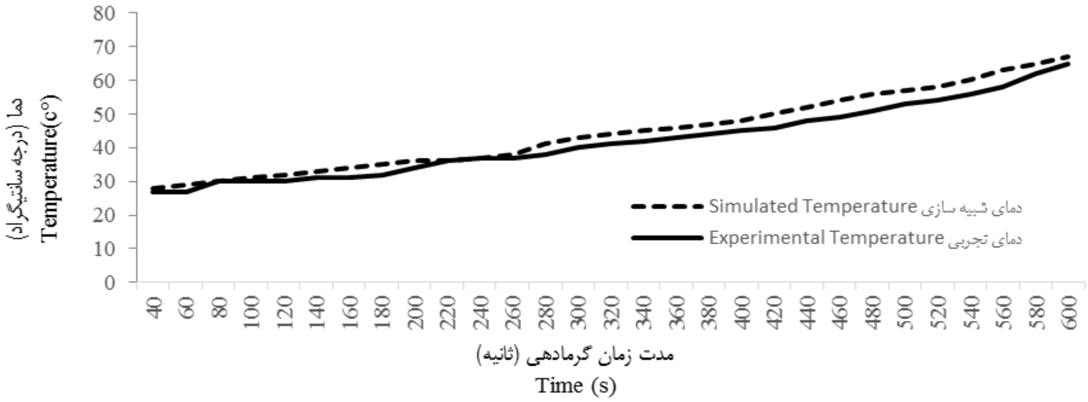


شکل۱۰- نمودار دمای شبیه‌سازی شده و دمای تجربی در نقطه ۲ متناسب با مدت زمان گرمادهی

Fig.10. The experimental and simulated temperature profile for the time heating in point 2

در نقطه ۲ دمای شبیه‌سازی شده و تجربی در مدت زمان ۱۰۰ ثانیه همدیگر را قطع می‌کنند که مفهوم آن برابری دما در این مدت زمان می‌باشد. دمای شبیه‌سازی شده با افزایش زمان تقریباً با شیب یکنواختی افزایش می‌یابد، اما دمای تجربی در مدت زمان ۲۶۰ تا۲۸۰ ثانیه افزایش ناگهانی داشته ولی پس از آن تقریباً به موازات دمای شبیه‌سازی شده با شیب یکنواختی با افزایش زمان، افزایش را نشان می‌دهد، حداکثر دما در این حالت پس از ۶۰۰ ثانیه به حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد (شکل ۱۰). میانگین دماهای تجربی و شبیه‌سازی شده در نقطه ۲ به‌ترتیب ۱۲۳/۶۸ و ۱۴۷/۴۴ درجه سانتی‌گراد است.

در این نقطه، بین دمای شبیه‌سازی شده و تجربی گرچه تفاوت وجود دارد اما این تفاوت ناچیز بوده و از آماری با توجه به نمره t (۱/۳۶-)، درجه آزادی (۵۸) و سطح معنی‌داری (۰/۱۷۸) در سطح ۵ درصد معنی‌دار نمی‌باشد. یعنی بین دمای شبیه‌سازی و تجربی تفاوتی وجود ندارد و نسبتاً با هم یکسان می‌باشند که این امر مطابق با یافته‌های Salema و Afzal (۲۰۱۵) می‌باشد.



شکل ۱۱- نمودار دمای شبیه‌سازی شده و دمای تجربی در نقطه ۳ متناسب با مدت زمان گرمادهی

Fig.11. The experimental and simulated temperature profile for the time heating in point 3

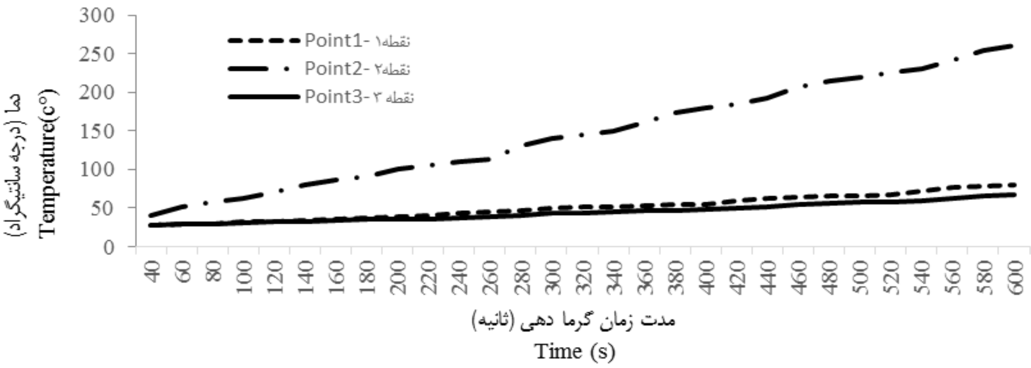
نقطه ۳، نسبت به نقاط ۱و ۲ بیشترین نزدیکی دو دمای شبیه‌سازی و تجربی را نشان می‌دهد، به‌طوریکه در زمان‌های ۸۰، ۱۰۰، ۲۲۰ و ۲۴۰ ثانیه در دو حالت دماها با هم برابرند. در سایر زمان‌ها، دمای شبیه‌سازی و تجربی تقریباً با شیب یکنواختی روند افزایشی را نشان می‌دهند، که پس از۶۰۰ ثانیه حداکثر دما به حدود ۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. میانگین دماهای تجربی و شبیه‌سازی شده در نقطه ۳ به‌ترتیب ۴۱/۹۵ و ۶۵/ ۴۴ درجه سانتی‌گراد است.

در این نقطه، بین دمای شبیه‌سازی شده و تجربی گرچه تفاوت وجود دارد اما این تفاوت ناچیز بوده و از آماری با توجه به نمره t (۰/۸۸۱-)، درجه آزادی (۵۸) و سطح معنی‌داری (۰/۳۸۲) در سطح ۵ درصد معنی‌دار نمی‌باشد. یعنی بین دمای شبیه‌سازی و تجربی تفاوتی وجود ندارد و نسبتاً باهم یکسان می‌باشند که این امر مطابق با یافته‌های Rattanadecho (۲۰۰۶) می‌باشد.

مقایسه میانگین دماهای شبیه‌سازی شده و تجربی در نقاط ۱، ۲ و ۳

توزیع دما در بافت چوبی خصوصاً در مبارزه با آفاتی که در داخل بافت‌های چوبی هستند از اهمیت به‌سزایی برخوردار است که با کمک شبیه‌سازی می‌توان پیش‌بینی نمود که آیا در نقطه معلوم دما به حدی رسیده است تا منجر به نابودی آفات گردد یا خیر. با افزایش مدت زمان گرمادهی می‌توان دما را به حد مطلوب رساند. همچنین ضخامت نمونه چوبی در توزیع دما تأثیرگذار است. عامل مهم دیگر، فاصله نقطه هدف نسبت به مولد امواج می‌باشد. مقایسه اختلاف دما در نقاط ۱، ۲ و۳ به‌صورت دو به دو در دو حالت شبیه‌سازی و تجربی به کمک آزمون تحلیل واریانس انجام شد.

نتایج آزمون تحلیل واریانس نقاط ۱، ۲ و ۳ براساس دماهای شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری بین نقاط ۱، ۲ و ۳ براساس دماهای شبیه‌سازی شده وجود دارد که این اختلاف با توجه به نمره F (۳۹/۰۰۴)، درجه آزادی ۸۹ و سطح معنی‌داری (۰/۰۰۰) در سطح ۱ معنی‌دار است.



شکل ۱۲- نمودار دمای شبیه‌سازی شده– مدت زمان گرمادهی در نقاط ۱، ۲ و ۳

Fig.12. Simulated temperature profile- Time heating period in points 1, 2, 3

همان‌طور که از روی شکل ۱۲ مشهود است دما بین نقاط ۱ و ۳ در فاصله زمانی صفر تا ۲۰۰ ثانیه با هم برابر بوده و از ۲۰۰ تا ۶۰۰ ثانیه نزدیک به‌هم روند افزایشی با زمان را نشان می‌دهد، ولی اختلاف دما در نقطه ۲ با نقاط ۱ و ۳ زیاد می‌باشد.

جدول ۳- آزمون تعقیبی دانکن برای دماهای شبیه‌سازی شده در نقاط ۱، ۲ و ۳

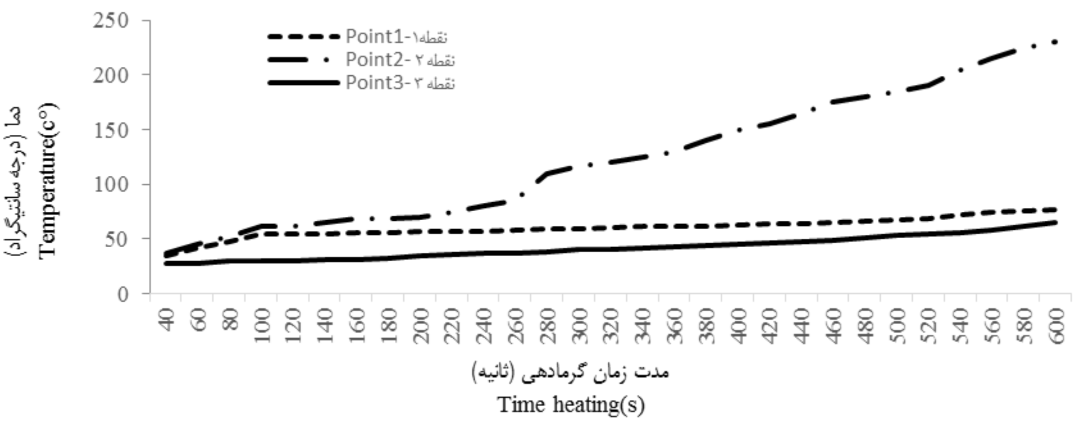
Table 3- Duncan post hoc test for simulated temperature in points 1, 2, 3

گروه Group	میانگین Mean
نقطه۱ Point1	41.46[a]
نقطه۳ Point3	590.20[a]
نقطه۲ Point2	120.46[b]

آزمون تعقیبی دانکن (جدول ۳) نیز نشان می‌دهد که دمای شبیه‌سازی شده در نقاط ۱و ۳ متفاوت نیست و در موارد دیگر در نقاط ۱و ۲، ۲و ۳ متفاوت است بدین معنی که بین دمای شبیه‌سازی شده در نقاط ۱ و ۳، تفاوت بسیار ناچیزی وجود دارد که این تفاوت از نظر آماری معنادار نیست و تفاوت در نقاط دیگر چشمگیر است.

نتایج آزمون تحلیل واریانس، نقاط ۱و ۲و ۳ براساس دماهای تجربی نشان می‌دهد که تفاوت معناداری بین نقاط ۱و ۲و ۳ براساس دماهای تجربی وجود دارد که این اختلاف با توجه به نمره F (۵۳/۷۶۴)، درجه آزادی ۸۹ و سطح معنی‌داری (۰/۰۰۰) در سطح ۱ معنادار است.

مقایسه دما در نقاط ۱، ۲ و ۳ در حالت تجربی نیز نشان از نزدیکی دما در نقاط ۱و ۳ دارد، نقطه ۲ نیز در فاصله زمانی صفر تا ۲۴۰ ثانیه با دمای نقطه ۳ اختلاف کمی داشته ولی پس از ۲۴۰ ثانیه تفاوت دمایی نقطه ۲ با نقاط ۳ و۱ خیلی زیاد افزایش نشان می‌دهد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- نمودار دمای تجربی– مدت زمان گرمادهی در نقاط ۱ و۲ و۳

Fig.13. Experimental temperature profile- Time heating period in points 1, 2, 3

آزمون تعقیبی دانکن (جدول ۴) نیز نشان می‌دهد که دمای تجربی در نقاط ۱و ۳ متفاوت نیست و در موارد دیگر در نقاط ۱ و۲، ۲و ۳ متفاوت است بدین معنی که بین دمای تجربی در نقاط ۱و ۳، تفاوت بسیار ناچیزی وجود دارد که این تفاوت از نظر آماری معنی‌دار نیست و تفاوت در نقاط دیگر چشمگیر است. با توجه به نقاط انتخاب شده روی قطر مکعب چوبی هرچه نقطه به منبع تولیدکننده امواج نزدیکتر باشد سرعت برخورد مولکول‌های آب بیشتر و در نتیجه دمای آن نقطه بالاتر می‌باشد. در پایان از مهمترین عوامل ایجاد اختلاف بین دمای شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار و دمای تجربی می‌توان به: خطای اندازه‌گیری ترمومتر به‌دلیل وجود امواج الکترومغناطیس، عدم دقت بالا در اندازه‌گیری پارامترهای مربوط به خصوصیات فیزیکی و مغناطیسی نمونه‌ی چوبی و از دست رفتن رطوبت نمونه چوبی در حین تکرار آزمایش و شکل نمونه چوبی که کاملاً مکعب مستطیل نیست، اشاره نمود. مقایسه نتایج دمای شبیه‌سازی شده و تجربی توسط Farag و همکاران (۲۰۱۲) برای نقاط مختلف بین ۲/۷ درصد تا ۱۵ درصد خطا را نشان داد.

جدول ٤- آزمون تعقیبی دانکن برای دماهای تجربی در نقاط ۱، ۲ و ۳

Table 4- Duncan post hoc test for experimental temperature in points 1, 2, and 3

گروه Group	میانگین Mean
نقطه۱ Point1	50.16[a]
نقطه۳ Point3	44.06[a]
نقطه۲ Point2	143.43[b]

نتیجه‌گیری

دما در نقطه‌ی ۲، بالاتر از نقاط ۱و ۳ می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان دادکه بین دمای تجربی و شبیه‌سازی شده در نقطه ۲ (مرکز مکعب چوبی) در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌داری وجود دارد که به احتمال زیاد این تفاوت به خطای اندازه‌گیری مربوط می‌شود. ولی در نقاط ۲ و ۳ بالا و پایین روی قطر مکعب تفاوت معنی‌داری بین دمای تجربی و شبیه‌سازی شده وجود ندارد. به کمک مقایسه میانگین‌ها در دماهای شبیه‌سازی شده و تجربی روی نقاط ۱، ۲ و ۳ می‌توان فهمید که در سطح ۱ درصد تفاوت معنی‌داری بین این نقاط وجود دارد. در اندازه‌گیری دمای تجربی برخی عوامل غیرقابل اجتناب وجود دارند.

برای آفت‌کشی در تنه درختان می‌بایست به‌جای یک تولیدکننده امواج، از چندین دستگاه مولد امواج استفاده نمود تا دما در تمام نقاط، و عمق نفوذ یکسان در زمان‌های مشابه برابر باشد. به‌عنوان مثال به‌جای دستگاه مایکروویو مکعبی، می‌توان محفظه مایکروویو استوانه‌ای شبیه‌سازی و طراحی نمود که متناسب با قطر تنه درختان قابل تنظیم بوده و مولدهای امواج روی محیط آن قرار گرفته باشند تا دما به‌صورت متقارن در راستای شعاع توزیع شود.

References

1. Al Shwear, M. S., and H. Remili. 2016. Three-Dimensional Simulation of Microwave Treatment of the Red Palm Weevil Insect. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering 6: 115-123.
2. Clarke, R. 2012. Magnetic propertiesof materials. Available at: http://fa.wikipedia.org/wiki. Accessed October 31, 2012.
3. Curet, S., O. Rouaud, and L. Boillereaux. 2009. Effect of Sample Size on MicrowavePower Absorption Within DielectricMaterials: 2D Numerical Results vs.Closed-Form Expressions. American Institute of Chemical Engineers (AIChE Journal) 55: 1569-1584.
4. Eqra, N., Y. Ajabshirchi, M. Sarshar, and S. S. Alavi. 2015. Comparison of microwave and ozonolysis effect as pretreatment on sugarcane bagasse enzymatic hydrolysis. Journal of Agricultural Machinery 5 (1): 35-44. (In Farsi).
5. Farag, S., A. Sobhy, C. Akyel, J. Doucet, and J. Chaouki 2012. Temperature profile prediction within selected materials heated by microwaves at 2.45GHz. Journal of Applied Thermal Engineering 36: 360-370.
6. Hajmohammadi, H., H. Sadrnia, and M. H. Abbaspourfard. 2013. Effect of Microwave Heating Treatment On Mortality Of Indian Meal Moth (PLODIA INTERPUNCTELLA) In Pistachio. Journal of Plant Protection (Agricultural Scienceand Technology) 27: 18-26. (In Farsi).
7. Hedayati, K., B. Emadi, M. Khojastehpour, and Sh. Beiraghi-Toosi. 2013. The Effect of Ultrasonic Waves on Sugar Extraction and Mechanical Properties of Sugar Beet. Journal of Agricultural Machinery 3 (2): 144-154.(In Farsi).
8. Massa, R., E. Caprio, M. D. Santis, R. Griffo, M. D. Migliore, G. Panariello, D. Pinchera, and P. Spigno. 2011. Microwave treatment for pest control: the case of Rhynchophorus ferrugineus in Phoenix canariensis. European and Mediterranean Plant Protection OrganizationBulletin 41: 128-135.
9. Massa, R., A. Greco, E. Caprio, G. Panariello, M. Donald Migliore, D. Pinchera, F. Schettino, and R. Griffo. 2015. Experimental Results on the Effectiveness of Microwave Treatment of Phoenix Canariensis PalmInfested by Rhynchophorus ferrugineus. International Conference on Environment and Electrical Engineering (IEEE), Mediterranean Microwave Symposium (MMS), Rome, Italy.
10. Mollazehi, S., and H. Sadrnia. 2016. Effect of Microwave Heating Treatment on Mortality on Date Red Palm Weevi l (Rhynchophorus Ferrugineus) For In chemical Combat. Iranian Journal of Biosystem Engineering 47: 93-102. (In Farsi).
11. Nelson, S. O. 1996. Review and Assessment of Radio Frequency and Microwave Energy for Stored

Grain Insect Control. American Society of Agricultural Engineers 39: 1475-1485.
12. Rattanadecho, P. 2006. The simulation of microwave heating ofwood using a rectangularwaveguide: Influence of frequency and sample size. Chemical Engineering Science 61: 4798- 4812.
13. Robinson, J. P., C. E. Snape, S. W. Kingman, and H. Shang. 2008. Thermal desorption and pyrolysis of oil contaminated drillcuttings by microwave heating. Analytical and Applied Pyrolysis 81: 27- 33.
14. Salema, A. A., and M. T. Afzal. 2015. Numerical simulation of heating behaviour in biomass bed and pelletsunder multimode microwave system. International Journal of Thermal Sciences 91: 12-25.
15. Yakovlev, V. 2006. Examination of Contemporary Electromagnetic Software Capable of Modeling Problems of Microwave Heating. Pages 13 in Porada W, Ed M, eds. Advances in Microwave and Radio Frequency Processing.
16. Zhao, S., X. Cheng, S. Xing, and C. Qiu. 2007. A thermal lethal model of rice weevils subjectedto microwave irradiation. Journal of Stored Products Research 43: 430-435.
17. Zhao, X., L. Yan, and K. Huang. 2011. Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials. Pages 22 in Grundas S, ed. Review of Numerical Simulation of Microwave Heating Process, vol. 766. Rijeka, Croatia: InTech.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 8, No. 2, Fall - Winter 2018, p. 333-345

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۸، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۷، ص ۳۴۵-۳۳۳

Prediction of Temperature Distribution within a Piece of Date Palm Trunk during the Microwave Heating Treatment to Control Rhynchophorus Ferrugineus

S. Mollazehi[1]- H. Sadrnia[2*]- M. R. Bayati[3]
Received: 11-02-2017
Accepted: 02-07-2017

Introduction

In recent decays, the microwave heating treatment is one of the best ways for the pest control. It is difficult to determine temperature in different parts of materials by Thermometer, but we can solve this problem by Comsol Multiphysics Software. In a research, results of a farm test were consistent with laboratory data and high temperature area was belonged to the outer part of wooden piece (Massa *et al*., 2015). The numerical simulation of Microwave heating was successfully done for fruits and compared with experimental measurement in two cylindrically and spherically states by Zhao et al (2011). The results indicated that, the temperature prediction in a wooden piece under heating of a Microwave system was in conformity with experimental infra-red rays data (Rattanadecho, 2006). The outer part of the piece was impressed by inspired heating and the inner part by transmission of heating (Massa *et al*., 2011). A high frequency structure simulator software, a radiant trumpet shaped antenna with 2.45GHz frequencies, 100 watt electric power were the tools that were used to predict the temperature at a Date Palm Wooden piece at 10, 12, 14 and 16 centimeters (Al Shwear and Remili, 2016). Microwave pretreatment was studied with two factors of Microwave radiation (170, 450, and 850 W) and Microwave duration (2, 6, and 10 min). It can be concluded that the Ozonolysis is the most effective pretreatment regarding to saccharification percentage of sugarcane bagasse (Eqra *et al*,2015). This study has been done with the aim of fighting with Rhynchophorus ferrugineus blight by microwave and removing toxins in crops.

Materials and Methods

Samples features such as physical, mechanical and magnetic once were established in both Tehrans Material and Energy lab and Polymer and Petrochemical Research Center, Then it was simulated by Time_ Temperature profile software. For simulating research by Comsol Multiphysics software, at first sample and chamber sizes were determined and the type of material, meshing, 2.45GHz frequencies and the time duration of heating were measured, respectively. Finally the research was analyzed and Time_Temperature profile which was one of the outcomes of Multiphysics software was determined. A cubic piece of wood (103×86×78 mm) (Fig. 1), a Digital Thermometer and a Microwave are the tools which the researcher used in this sample. The temperature was measured at three different parts of cub diagonal by Thermometer. At first, the wooden sample was divided in two equal parts and a sensor was placed in the middle of it and then it was placed in the Microwave. The primary temperature of sample and Microwaves was 27°C. We turn the Microwave on for a period of 10 minutes, after that we check the wooden piece temperature by Thermometer at 20 seconds intervals.

Results and Discussion

T-test was used to compare statistical results achieved by simulated and experimental temperature of cubic diagonal. According to T mark at 5 percent level, we can say that there is a significant difference between simulated and experimental temperature at point1, however, there is no such a significant difference at 2 and 3 points. In the following phase, the temperature was compared at two simulated and experimental states by variance analysis test. There was significant difference at 1, 2 and 3 points according to data are shown at figure 4. Moreover, Duncan Post hoc test is shown at figures 5 and 7 that experimental temperature shows no difference at 1 and 3 points but it makes difference at 1, 2 and 2, 3 points.

Conclusions

1, 2 and 3- PhD student, Associate Professor and Assistant Professor, respectively, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
(*- Corresponding Author Email: Hassan.Sadrnia@ferdowsi.um.ac.ir)

Results show that the simulation model can predict the temperature in different parts of a wooden sample. The temperature will be higher as much as the points will be closer to the wave producer resource. In order to control pests in the trunk of a tree, we should use several wave generator systems, instead of ones. It is recommended that cylindrical microwave should be simulated and designed instead cubic ones, because it is better adjusted with tree stock and the wave generator system is placed on this surface so that the temperature will be distributed symmetrically along the diagonal.

Keywords: Comsol multiphysics software, Microwave, Simulation, Temperature profile prediction